XTAP 例題集	番　号	PV-02-B

例題名	メガソーラ用 PCS の基礎的な瞬時値解析モデルを用いた 系統事故発生時のシミュレーション（平均値モデル）
分　野	電力系統解析，系統連系，パワーエレクトロニクス
文　献	主な文献として， [1] 分散電源の大量連系解析モデル調査専門委員会，「分散電源の大量連系解析モデル」，電気学会技術報告 第 1487 号，2020. [2] 米澤，福島，野田，関場，伊藤，三澤，千田，山口，中島，宇都宮，竹内，「系統事故発生時の解析を目的とした大規模太陽光発電システムの瞬時値解析モデルの開発」，電気学会 電力技術/電力系統技術合同研究会，PE-15-151, PSE-15-173, pp.99-104，2015-09. そのほかの参考文献については本票末に記す。
概　要	例題 PV-02-A「メガソーラ用 PCS の基礎的な瞬時値解析モデルを用いた系統事故発生時のシミュレーション」では，実際の PCS 同様に PCS 内部の半導体素子のスイッチング動作を考慮したモデルにより解析を行ったが，このモデルではスイッチングの模擬に伴い解析時間刻みを小さくとる必要があり，計算に時間を要する。計算の高速化を目的に，半導体素子のオン・オフ動作を平均化し，各アームの電圧を電圧源としてモデル化する平均値モデルが知られている。平均値モデルではスイッチングに伴う高調波が模擬されないが，計算時間刻みを大きくとれるため，動作が高速となる。そこで本例題では，例題 PV-02-A で用いられている PCS モデルを平均値モデルに置き換えた場合のシミュレーションを行い，スイッチングモデルと動作を比較する。 なお，回路条件などについては例題 PV-02-A の例題票を参照されたい。

解析回路・解析条件

図 1 に，XTAP 上に模擬した高圧配電系統と，そこに接続されるメガソーラの回路図を示す。系統周波数は 50 Hz である。PCS モデルが平均値モデルであることを除き，例題 PV-02-A と同一である。

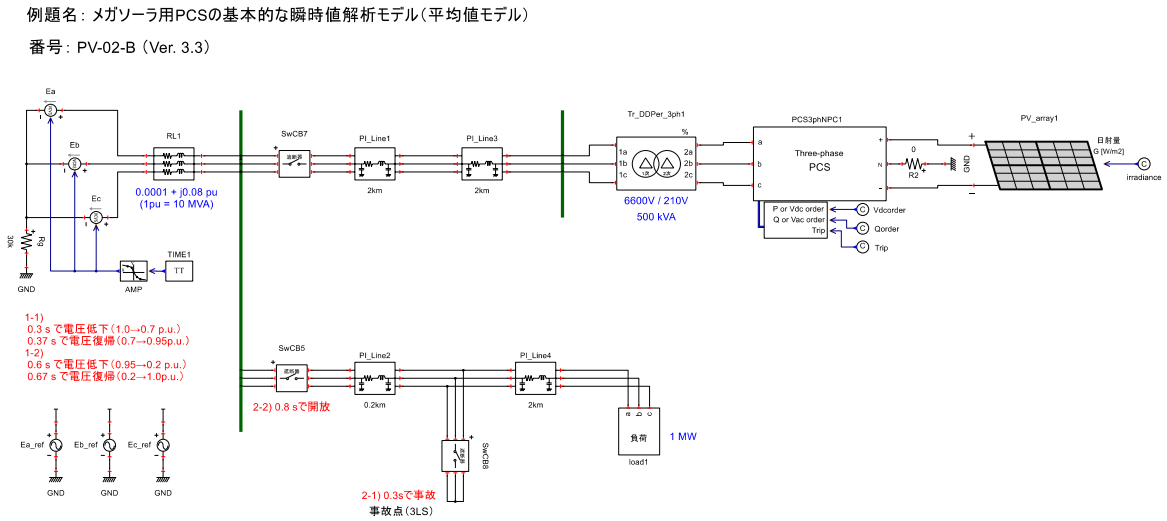


図 1　XTAP 上に模擬した高圧配電系統と，そこに接続されるメガソーラの回路図

図 2 に，三相 PCS（平均値モデル）の内部構成を示す。図中の赤破線枠内の部分以外は，スイッチングモデルと同一である。平均値モデルでは後述するように各アームの電圧出力を電圧源で模擬するため，PWM は不要であるため，ブリッジへは各相の出力電圧の指令値をそのまま入力する。

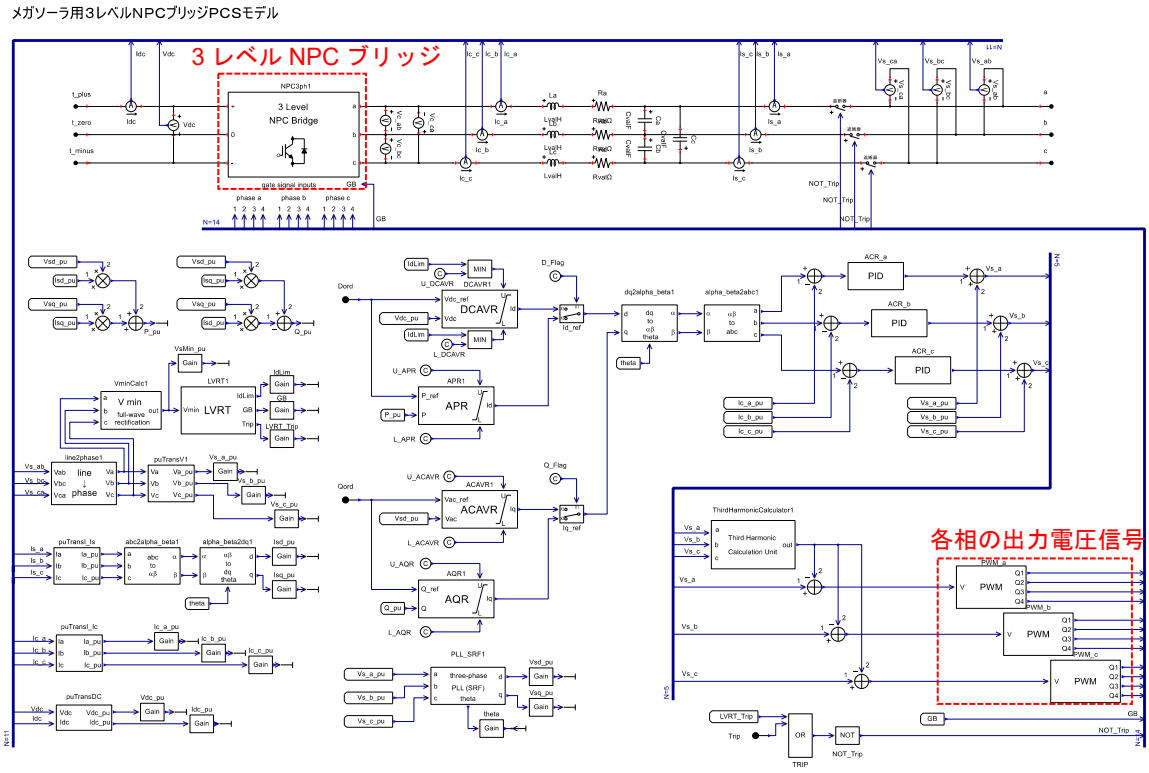


図 2　三相 PCS（平均値モデル）の内部構成

図 3 に，3 レベル NPC ブリッジの平均値モデルを示す。直流側に電流源，交流側に電圧源が配置される。直流側の電流源は交流側の電圧源に流れる電流に対して PWM のオン・オフの比に相当する信号 k（出力電圧信号と等しくなる）を乗じた値を流し，交流側の電圧源は，直流電圧（直流コンデンサの電圧）に対して k を乗じた電圧を印加する。これにより，直流側と交流側の電力が等しくなる。平均値モデルの実装方法には様々な手法が提案されているが [3] ~ [5]，ここでは図 3 に示すように，3 レベル NPC ブリッジの過渡特性を模擬することを目的に，二つのコンデンサと並列に 6 つの電流源を，また交流側には 6 つの電圧源を配置し，それぞれ上下の電源が出力電圧信号の正側と負側に対応するように配置している。このように回路を構成することで，後述するようにスイッチングモデルと同等の過渡特性を模擬できる。

また，ゲートブロック時には，各電流源，電圧源の出力を零に設定するとともに，交流側に配置されたスイッチを開放することで，ゲートブロックの動作を簡易的に模擬する。なお，ゲートブロック時に半導体素子に並列接続されるダイオード（整流回路）の過渡的な動作を正しく模擬する必要がある場合は，これを考慮可能なモデル（例えば [6], [7]）を用いる必要がある。

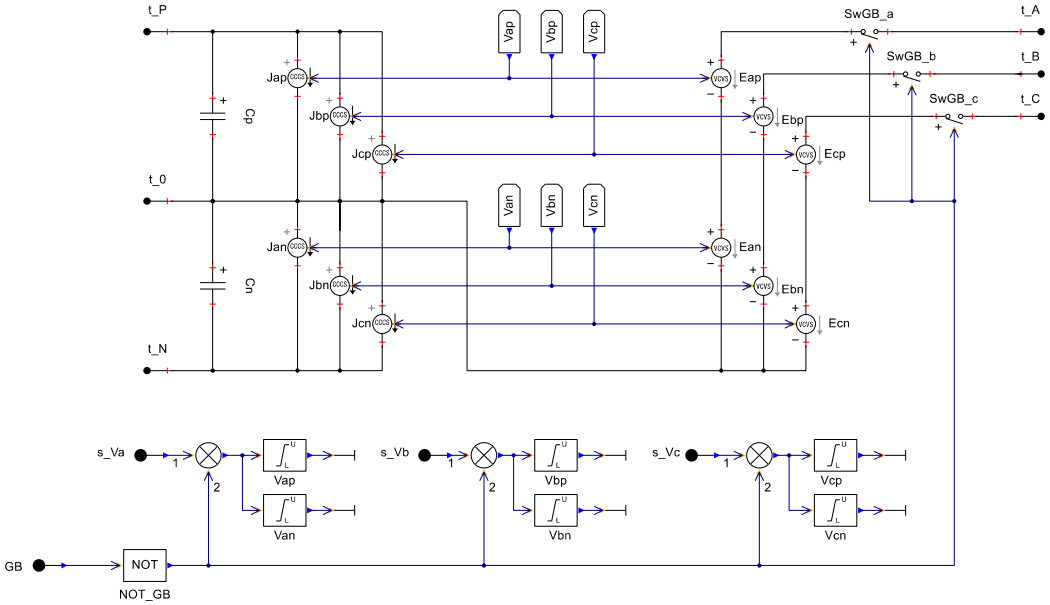


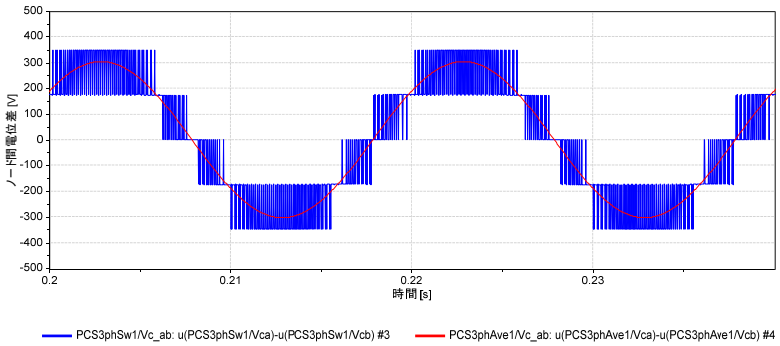
図 3　3 レベル NPC ブリッジの平均値モデル

本例題では平均値モデルを用いるため，計算時間刻みは 40 μs に設定した。

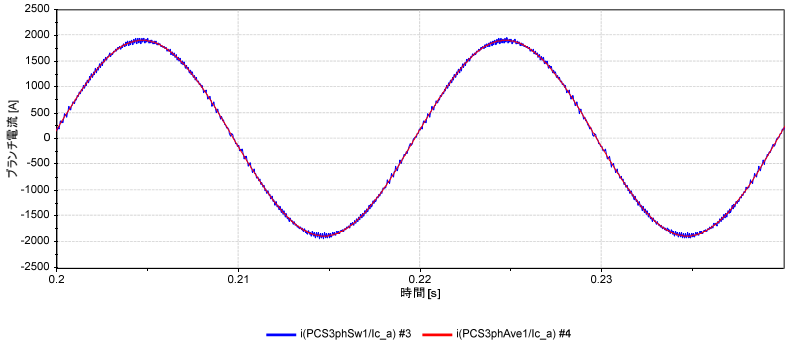
解析結果

ここでは，上位系統の 3LGO を想定した瞬時電圧低下の動作についてのみ説明する。

図 4 に，定常運転状態（0.2 ~ 0.24 s）における，PCS の系統連系リアクトルよりも変換器側の ab 相間の線間電圧 $V_{c,ab}$，各相の線電流 I_c をスイッチングモデルの結果（PS-02-A の結果）と本例題である平均値モデルの結果を重ねて示す。図から明らかな通り，スイッチングモデルでは電圧波形が方形波状となっている（3 レベルであるため相電圧で 3 レベル，線間電圧で 5 レベルの方形波となる）が，平均値モデルでは正弦波状のノイズのない綺麗な波形となっている。電流についても，スイッチングモデルではスイッチングに伴う高調波が重畳していることが確認できるが，平均値モデルではこれらがない綺麗な波形となっている。



（a） ab 相間の線間電圧

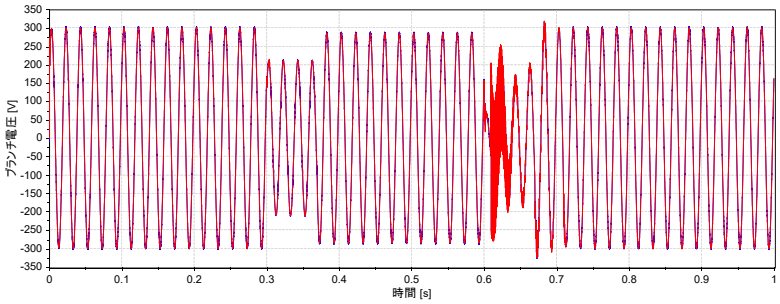


(b) 各相の線電流

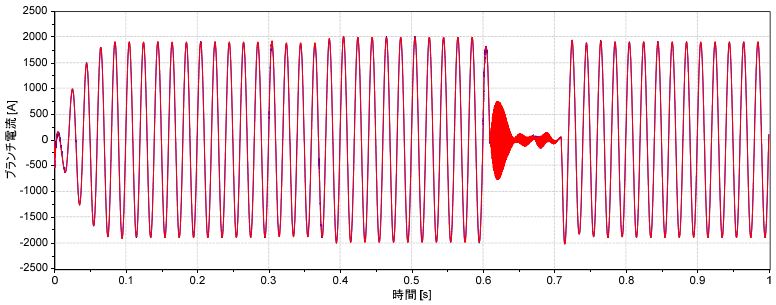
図 4　スイッチングモデルと平均値モデルの比較 1

（青：スイッチングモデル，赤：平均値モデル）

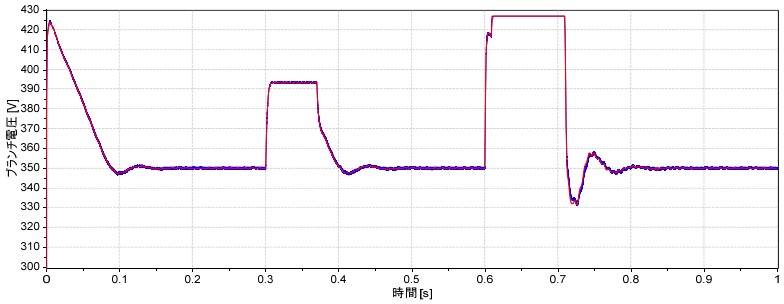
図 5 に，PCS 交流側 ab 相間の系統電圧，a 相の出力電流，直流側の電圧，PCS が出力する有効電力，無効電力について，スイッチングモデルの結果（PS-02-A の結果）と本例題である平均値モデルの結果を重ねて示す。図から明らかな通り，いずれの電圧波形，電流波形，制御信号（出力電力）についても，スイッチングモデルと本例題の平均値モデルはよく一致している（波形はほぼ重なっている。それぞれの例題を計算し，各自で確認されたい）。



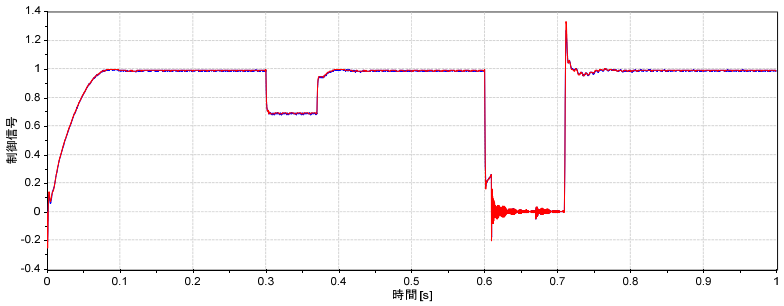
(a) 交流電圧（ab 相間）



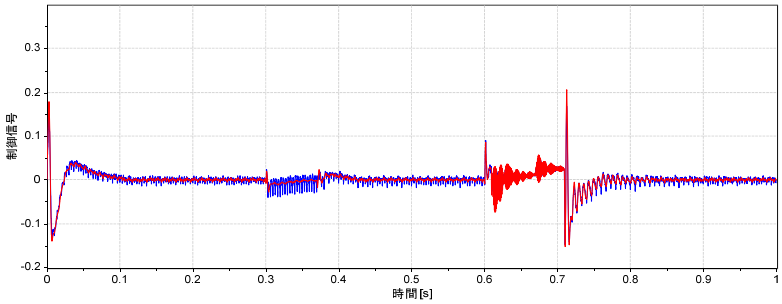
(b) 交流電流（a 相）



(c) 直流電圧



(d) 有効電力

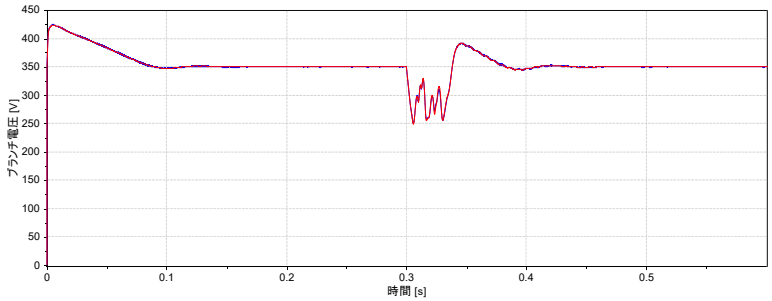


(e) 無効電力

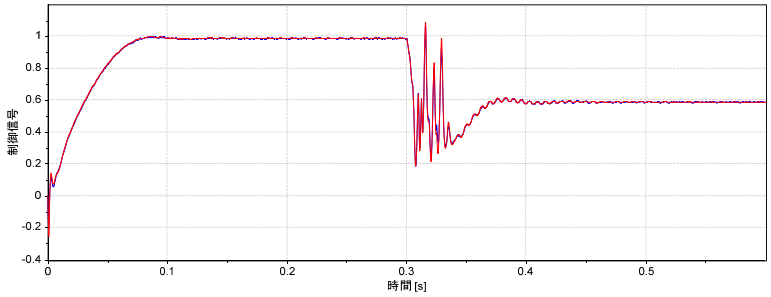
図 5　スイッチングモデルと平均値モデルの比較 2

（青：スイッチングモデル，赤：平均値モデル）

また図 6 に，同じ回路を利用し，事故を発生させる代わりに，PV パネルへの入力信号（日射量）を 0.3 s 時点で 1000 から 600 にステップ状に変化させた際の直流電圧，有効電力を，それぞれのモデルで計算した結果を示す（実際の PCS では，このような日射量の変化が生じると MPPT 制御により直流電圧の指令値が変化するが，この解析例では MPPT 制御は考慮していないため，直流電圧指令値は一定のままとなる点に注意されたい）。図から明らかな通り，入力の急峻な変化に対しても，平均値モデルではそれぞれの波形の過渡的な変化が概ね再現できている。



(b) 直流電圧



(b) PCS が出力する有効電力

図 6　スイッチングモデルと平均値モデルの比較 3

（青：スイッチングモデル，赤：平均値モデル）

参考文献

[1] 分散電源の大量連系解析モデル調査専門委員会，「分散電源の大量連系解析モデル」，電気学会技術報告 第 1487 号，2020.

[2] 米澤，福島，野田，関場，伊藤，三澤，千田，山口，中島，宇都宮，竹内，「系統事故発生時の解析を目的とした大規模太陽光発電システムの瞬時値解析モデルの開発」，電気学会 電力技術/電力系統技術合同研究会, PE-15-151, PSE-15-173, pp.99-104，2015-09.

[3] Task force on modeling and analysis of electronically-coupled distributed resources, “Modeling guidelines and a benchmark for power system simulation studies of three-phase single-stage photovoltaic systems”, IEEE Trans. on power delivery, vol. 26, no. 2, April 2011.

[4] A. Yazdani, “Electromagnetic transients of grid-tied photovoltaic systems based on detailed and averaged models of the voltage-sourced converter,” IEEE PES General Meeting, San Diego, CA, 2011.

[5] R. Yonezawa, T. Noda, K. Fukushima, T. Nakajima, Y. Sekiba, K. Utsunomiya, E. Ito, K. Misawa, T. Chida, N. Yamaguchi, and Y. Takeuchi, “Development of detailed and averaged models of large-scale PV power generation systems for electromagnetic transient simulations under grid faults,” Proc. of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT-Asia), pp. 98-104, 2016.

[6] 菊間，岡田，「系統擾乱時の応動を高速に解析可能な瞬時値変換器モデルの開発－整流回路月平均値モデル－」，電力中央研究所 研究報告 R15022，2015.

[7] 佐野，米澤，野田：「配電系統の動的電圧解析を目的とした系統連系用インバータの瞬時値解析モデル」，電気学会論文誌 B, vol. 138, no. 8, pp. 685-694, 2018.

更　新　履　歴		
日　付	例題ファイル バージョン	変　更　内　容
2021/06/22	1.0	初版作成（XTAP Version 3.3 用）
2025/07/07	1.1	PCS の有効電力，無効電力の演算に誤りがあったため修正。